

動画画像解析による路面たわみ量を用いた 合理的路面下空洞陥没危険度評価手法

Rational Road Subsidence Hazard Assessment Method Using Pavement Deflection Measurement through Video Image Analysis

中西典明	小泉圭吾	丁經凡	白濟民
Noriaki Nakanishi	Keigo Koizumi	Kyungbeom Jeong	Jemin Baek
塚本真也	福田芳雄	梅田隼	澁谷啓
Shinya Tsukamoto	Yoshio Fukuda	Jun Umeda	Satoru Shibuya

1. はじめに

近年、各所において路面陥没事故が発生しており、これらを防止するため道路管理者はレーダー探査による空洞調査を実施している。

神戸市では、令和 2 年度に延長 129km、令和 3 年度に延長 102km の路面下空洞調査を行い、令和 2 年度に 275 箇所、令和 3 年度に 375 箇所の異常箇所を検出している (図-1)。図-1 に示す異常箇所のうち緊急度の高い A ランク空洞は各調査年度中に補修されたが、B ランク、C ランク空洞は、スコープ調査で空洞形状を詳細調査し、グラウト充填等の対策を次年度以降に検討していくこととしている。しかし、毎年実施される路面下空洞調査で確認される数百の空洞すべてに対策を行うことは現実的ではなく、陥没危険度の低い空洞は経過観察とするといった判断が必要となってくる。

筆者らは、大量の B、C ランク空洞の補修を、合理的な指標に基づき優先順位を決めて戦略的に補修を進める方法として、空洞上に载荷した際の路面のたわみ量を用いて空洞補修の優先度を決定する手法を提案し¹⁾²⁾³⁾、FWD (Falling Weight Deflectometer) を用いて空洞上部に重錘を落下させた際の路面の変位量と空洞部の路面耐力の関係性から空洞の力学的な耐力差の評価が可能であることを確認している。車載型 FWD は、構造的に道路上の任意の位置 (特に横断方向) において路面変位を計測が困難である。また、計測時には一定時間車両が道路を占有するため、交通への影響も生じている。また、計測に用いる車両も非常に高価である。これに対し、より簡易な路面たわみ量計測手法として、安価かつコンパクトな CCD カメラを用いて変位を高精度に検出可能な OCM (Orientation Code Matching) に着目し、OCM による路面のたわみ計測手法に

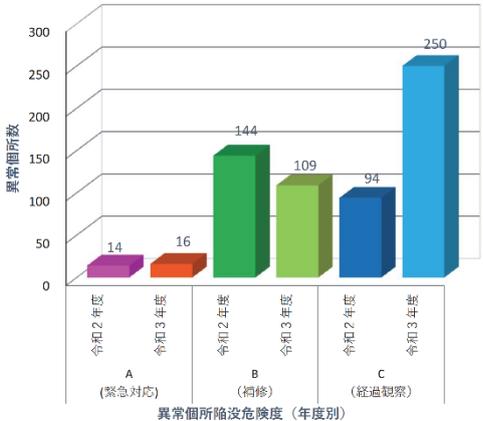


図-1 神戸市における空洞調査結果



写真-1.1 FWD と OCM による計測状況

より簡易な路面たわみ量計測手法として、安価かつコンパクトな CCD カメラを用いて変位を高精度に検出可能な OCM (Orientation Code Matching) に着目し、OCM による路面のたわみ計測手法に

ついて検討を行い²⁾、路面のたわみ量を OCM で計測可能であることを確認した⁴⁾ (写真-1.1)。

本研究では、より経済的で簡易な計測手法として、この路面たわみ量計測技術の走行車両の輪荷重による計測への適用性を検討した。

2. 路面下空洞箇所における輪荷重による路面動的変位計測

2.1 計測方法

図-2.1 に示す様に、計測点を通過するダンプトラックのタイヤ直近の路面変位を路肩から CCD カメラで計測する。空洞中心から CCD カメラまでの距離は 1.5m とした。(写真-2.1)

計測の際は 2 台の CCD カメラでダンプトラックの車輪が、表-2.1 に示す路面下空洞地点において空洞中心部を通過する箇所と空洞近傍の健全部を通過する箇所の路面変位を同時に撮影し、路面変位を解析によって求める。載荷車両として最大載荷させた 4t ダンプトラックを使用した。この時、前輪軸重は 29kN、後輪軸重は 51kN であった。

計測は平成 3 年度に実施された路面下空洞調査で確認された空洞の中から表-2.1 に示す空洞を対象とし、載荷ケースは表-2.2 に示す 7 ケースとした。

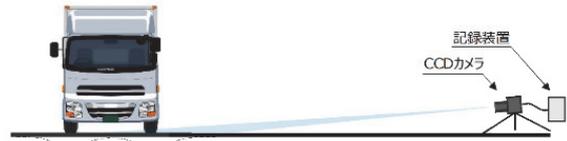


図-2.1 車両輪荷重による路面変位計測



写真-2.1 車両輪荷重による計測状況

表-2.1 計測対象空洞諸元

空洞番号	空洞規模 (m)				陥没危険度
	縦断方向	横断方向	発生深度	空洞厚	
26-014	1.8	1.1	0.8	—	C

表-2.2 載荷ケース

ケース	空洞/健全	走行速度	摘要
1	空洞	停車	
2	空洞	徐行	
3	空洞	10km/hr	
4	空洞	20km/hr	
5	空洞	30km/hr	
6	空洞	40km/hr	
7	健全	40km/hr	

2.2 OCM による輪荷重載荷時のたわみ量計測結果

表-2.2 に示す 7 ケースの計測結果を以下に示す。ケース 1 は空洞中心上に後輪荷重中心を停止させた場合、ケース 2 は極低速で空洞上を通過した場合、ケース 3~6 は空洞上を各走行速度で通過させた場合、ケース 7 は、比較対象として、空洞のない箇所（健全部）を通過させた際のたわみ量を計測したものである。各ケースのたわみ量の変化状況を図-2.2 から図-2.8 に示す。

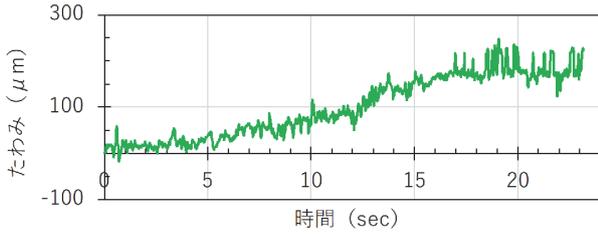


図-2.2 CASE1 停車時 (空洞上)

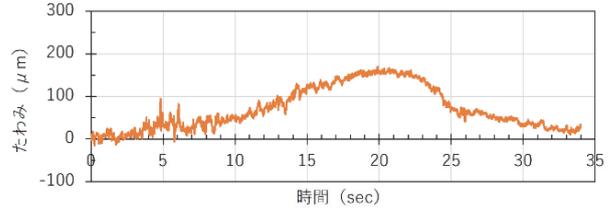


図-2.3 CASE2 極低速走行時 (空洞上)

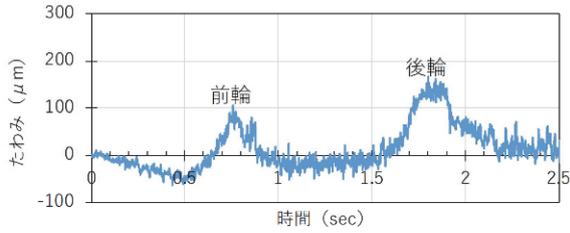


図-2.4 CASE3 10km/h (空洞上)

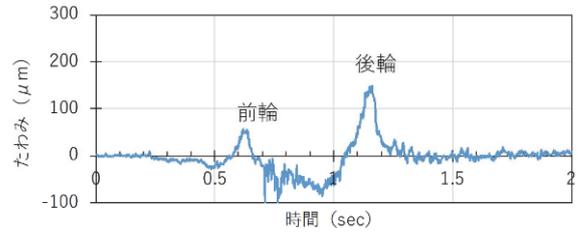


図-2.5 CASE4 20km/h (空洞上)

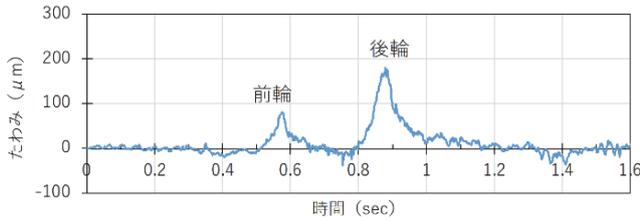


図-2.6 CASE5 30km/h (空洞上)

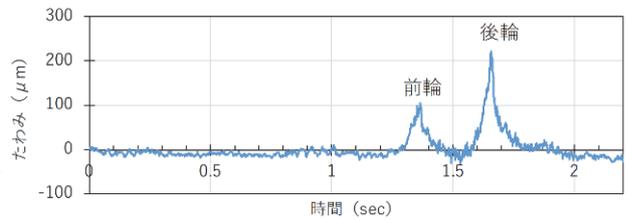


図-2.7 CASE6 40km/h (空洞上)

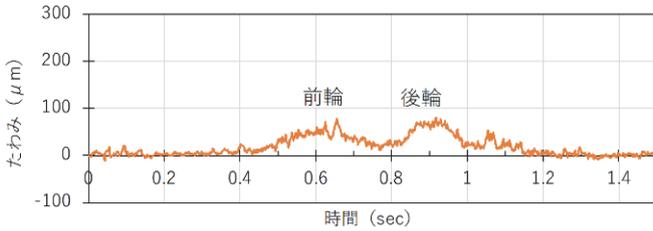


図-2.8 CASE7 40km/h (健全部)

各ケースの最大たわみ量と停車時最大たわみ量に対する車両走行時のたわみ量増加率を表-2.3 に示す。停車時(図-2.2 CASE1 停車時)の最大たわみ量は、停車後の平均値とした。表-2.3 に示す通り、30km/hr 以下では、通過時の最大たわみ量は停車時の最大たわみ量を下回り、40km/hr で停車時を上回る結果となった。これは、一定速度を超えると、路面のたわみ量が衝撃の影響を受ける可能性を示していると推定する。

表-2.3 停車時たわみ量に対する最大たわみ量変動率(*)

走行状態	最大たわみ量 (μm)	停車時に対する変動率
停車時	188	100%
10km/hr	167	89%
20km/hr	150	80%
30km/hr	181	96%
40km/hr	222	118%

2. 3 OCM を用いた輪荷重による路面たわみ計測の適用性

表-2.4 に路面下空洞 26-14 に対し、FWD を用いて載荷した際と輪荷重を載荷した際の最大たわみ量を比較する。最大たわみ量は FWD 載荷、輪荷重載荷にかかわらず、載荷荷重にほぼ比例している。また、たわみ量増加率は、30km/hr 以下で約 2 倍、40km/hr で約 2.8 倍となり、FWD での値と同様に空洞部と健全部の違いが明確に表れている。

表-2.4 FWD 荷重とダンプロック荷重による路面たわみ量比較

載荷方法	荷重ケース	載荷荷重	最大たわみ量 (μm)		たわみ量増加率 D_h/D_s
			空洞部(D_h)	健全部(D_s)	
FWD	FWD(50kN)	50kN	410.1	177.7	231%
	FWD(75kN)	75kN	514.8	234.5	220%
ダンプロック	停車時	後輪荷重(25kN)	188	80	235%
	10km/hr	後輪荷重(25kN)	167	80	209%
	20km/hr	後輪荷重(25kN)	150	80	188%
	30km/hr	後輪荷重(25kN)	181	80	226%
	40km/hr	後輪荷重(25kN)	222	80	278%

2. 4 輪荷重載荷点におけるたわみ量分布の計測

空洞上の最大たわみ発生個所と最大たわみ量、過重載荷点のたわみ分布等を把握することを目的として、任意の輪荷重載荷点のたわみ量ピーク値を計測可能となるよう OCM 解析ソフトを改良した。

写真-2.3 に示す計測点における輪荷重載荷時のたわみ量ピーク値の計測結果を図-2.9 に示す。



写真-2.3 輪荷重によるたわみ計測状況

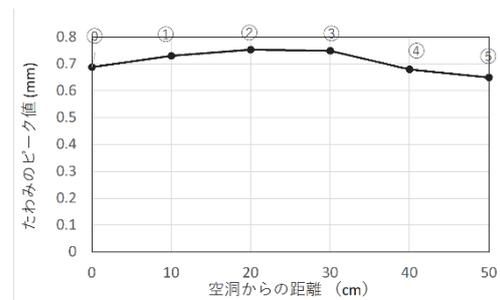


図-2.9 たわみ量ピーク値計測例

2. 5 まとめ

今回、健全部と空洞部での輪荷重載荷時の路面たわみ量を OCM によって計測可能であり、FWD によって載荷した時のたわみ量と比較することで、計測値が一定の信頼性を有することを確認した。以上より、FWD 等の特殊な載荷装置を用いず、走行車両の輪荷重を載荷荷重として路面のたわみ量を OCM によって計測する手法の陥没危険度評価への適用性が認められたと考える。

また、たわみ量ピーク値分布を計測可能としたことで、路面下空洞上のたわみ量が最大値を把握可能となった。

3 現行路面陥没危険度評価手法と空洞上路面たわみ量

3.1 解析の目的

現行の空洞の平面的規模と空洞の土被りによる空洞陥没危険度評価と路面たわみとの関係性を確認するため、空洞規模や空洞断面形状の違いによる、路面下空洞箇所の陥没危険度と荷重載荷時の路面たわみ量との空洞陥没危険度との関係を解析的に求める。

3.2 解析ケース

(1) 空洞断面形状

本解析では、図-3.1に示す半円形の空洞および矩形の空洞を対象に解析を行った。本解析では、空洞高Hを空洞幅の1/2とした。

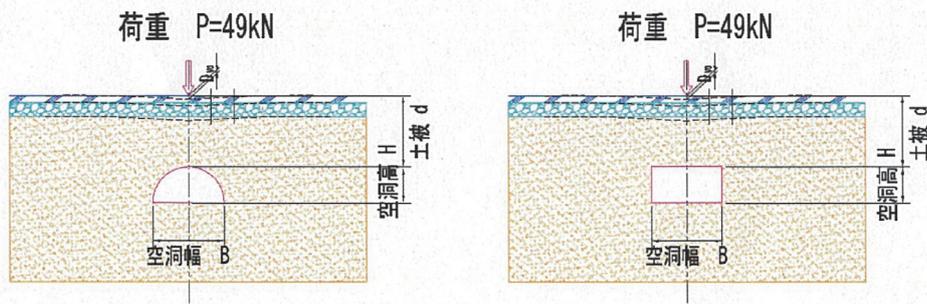


図-3.1 空洞形状

(2) 形状規模

上記の2つ空洞形状に対して、空洞の短辺方向幅と空洞深度を変え、解析を実施した。空洞の形状および規模の組合せは表-3.1とした。

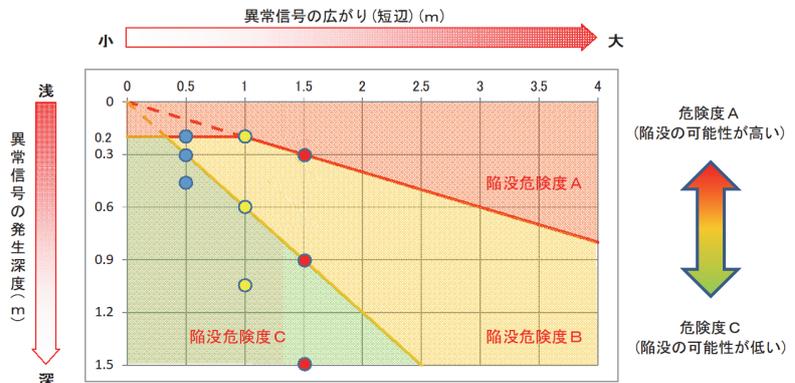
表-3.1 空洞幅と深度の組み合わせ

組合せ番号	空洞の大きさ		発生深度 d(m)		
	空洞幅 B(m)	空洞高 H(m)	1	2	3
① (Ⅱ)	0.50	0.25	0.20	0.30	0.50
② (Ⅱ)	1.00	0.50	0.20	0.60	1.00
③ (Ⅲ)	1.50	0.75	0.30	0.90	1.50

※ ①, ②, ③ : 半円形, ①, ②, ③ : 矩形

半円形空洞および四角形空洞それぞれにおいて各9ケースに空洞のない1ケースを加え、総19ケースの解析を行った。

各解析ケースを表-3.2にまとめた。また、それぞれの空洞を一般社団法人全国地質調査業協会連合会の「路面下空洞探査技術マニュアル(案),平成29年9月」の危険度評価(図-3.2)に基づいて評価した結果も示している。



※ ○: 本解析の対象空洞の幅と発生深度

図-3.2 路面陥没発生の危険度評価
(一般社団法人全国地質調査業協会連合会)

表-3.2 解析ケース

解析ケース		空洞の大きさ		発生深度 d(m)	危険度評価 (図-3.2 参照)
		空洞幅 B(m)	空洞高 H(m)		
空洞なし (健全)	N	-	-	-	-
半円形 空洞	①-1	0.50	0.25	0.20	陥没危険度 A
	①-2			0.30	陥没危険度 B
	①-3			0.50	陥没危険度 C
	②-1	1.00	0.50	0.20	陥没危険度 A
	②-2			0.60	陥没危険度 B
	②-3			1.00	陥没危険度 C
	③-1	1.50	0.75	0.30	陥没危険度 A
	③-2			0.90	陥没危険度 B
	③-3			1.50	陥没危険度 C
短形 空洞	Ⅰ-1	0.50	0.25	0.20	陥没危険度 A
	Ⅰ-2			0.30	陥没危険度 B
	Ⅰ-3			0.50	陥没危険度 C
	Ⅱ-1	1.00	0.50	0.20	陥没危険度 A
	Ⅱ-2			0.60	陥没危険度 B
	Ⅱ-3			1.00	陥没危険度 C
	Ⅲ-1	1.50	0.75	0.30	陥没危険度 A
	Ⅲ-2			0.90	陥没危険度 B
	Ⅲ-3			1.50	陥没危険度 C

3.3 解析方法

(1) 解析概要

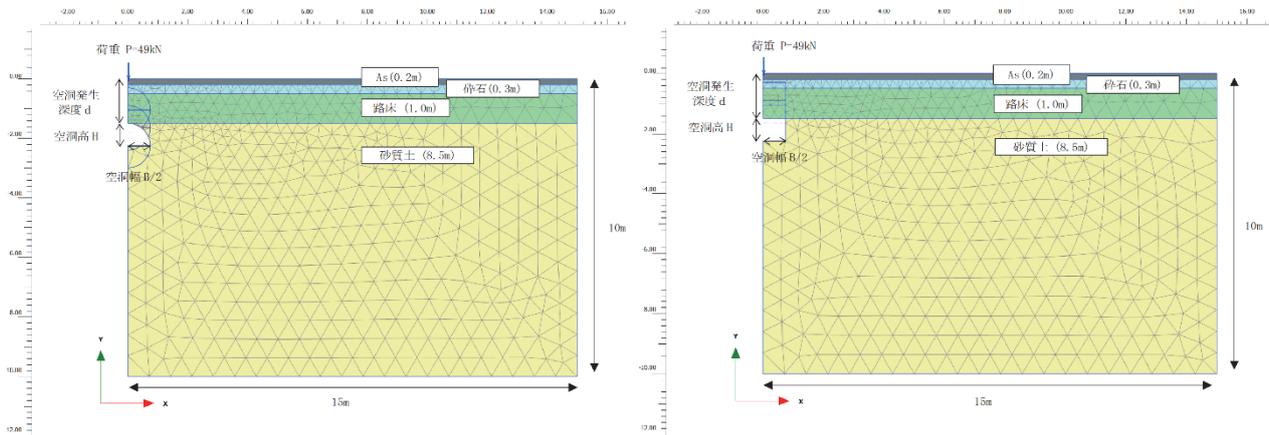
本解析では、汎用性が高い有限要素解析(FEM)プログラムである PLAXIS2D を用いて 2次元地盤変形解析を実施した。FEM 数値解析により FWD 試験を再現し、路面のたわみ量を評価した。

(2) 解析モデル

FEM 解析では、アスファルト(As)、砕石、路床、砂質土の地層を区別して解析モデルを作成した。各地層をソリッドエレメントでモデリングし、材料の構成モデルとしては、線形弾性-完全塑性モデルの Mohr-Coulomb モデルを採用した。一方、本検討での対象断面は、対称断面であるため判断面のみモデル化して解析を行った。また、全解析モデルの範囲は、幅=15m、厚さ=10mとした。図-3.3 に半円形空洞および四角形空洞の解析モデル例を示す。

(3) 境界条件

FEM 数値解析では、解析時間および精度のため、ある範囲の解析領域を作成し、解析モデルの側面および下部境界に適正な境界条件を設定する。本解析では、側面境界部に鉛直自由および水平拘束の境界条件を設定し、下部境界部には、水平変位と鉛直変位を固定する境界条件を設定した。(図-3.3)



(a) 半円形空洞の解析モデルの例

(b) 四角形空洞の解析モデルの例

図-3.3 解析モデル例

(4) 地盤物性値

本解析で採用した地盤物性値を表-3.3にまとめた。ちなみに、碎石、路床、砂質土層は、空洞が形成されるようにするため、粘着力 (35kN/m^2) を考慮した。

表-3.3 地盤物性値

区分	層厚 (m)	想定 N 値	単位体積重量 γ_s (kN/m^3)	弾性係数 E (kN/m^2)	ポアソン比 v	内部摩擦角 ϕ ($^\circ$)	粘着力 c (kN/m^2)
As	0.20	50	22.5	6,000,000	0.35	42	200
碎石	0.30	40	19.0	112,000	0.35	39	35
路床	1.00	35	19.0	100,000	0.35	38	35
砂質土	8.50	10	18.0	28,000	0.35	27	35

(5) 解析手順

本解析では、まず、地層をモデリングして初期応力条件を再現した。その後に当該解析ケースにおける空洞の規模および位置を反映して空洞を生成し、変位初期化を行った。最後に FWD 測定と同様に空洞の直上部に荷重を載荷して地表面の鉛直変位を算定してたわみ量を検討した。一方、空洞の無い条件に関しては、「Step ini」の初期応力条件を再現した後に変位初期化をして (Step 1 省略)、荷重を載荷して解析を行った。

Step ini : 地層および地盤条件モデリング

Step 1 : 空洞の生成 → 変位初期化 → Step 2 : 荷重載荷

3.4 解析結果

(1) 最大たわみ量

表-3.4に全解析ケースにおける最大たわみ量とたわみ量増加率 (%) を示す。この結果から、半円形の空洞より四角形空洞の場合、たわみ量が多いことが分かる。また、同じ形状 (幅と高さ) の空洞である場合、発生深度が浅いほど、たわみ量が大きくなることが確認できた。

ちなみに、四角形空洞において【2】-1) および【3】-1) ケースは、荷重載荷段階で、解析結果が収束せず、空洞形成時点で不安定な状態であることが想定された。この結果から、【2】-1) および【3】-1) 空洞は、陥没の危険度が高いと考えられる。

表-3.4 最大たわみ量のまとめ

解析 ケース	空洞の大きさ		発生深度 d(m)	危険度評価 (図-3.2 参照)	最大 たわみ量 (mm)	たわみ量 増加率(%)
	空洞幅 B(m)	空洞高 H(m)				
N	-	-	-	-	-1.96	100
①-1	0.50	0.25	0.20	陥没危険度 A	-2.28	116
①-2			0.30	陥没危険度 B	-2.24	114
①-3			0.50	陥没危険度 C	-2.17	111
②-1	1.00	0.50	0.20	陥没危険度 A	-3.11	158
②-2			0.60	陥没危険度 B	-2.52	128
②-3			1.00	陥没危険度 C	-2.40	123
③-1	1.50	0.75	0.30	陥没危険度 A	-3.62	185
③-2			0.90	陥没危険度 B	-2.78	142
③-3			1.50	陥没危険度 C	-2.59	132
Ⅰ-1	0.50	0.25	0.20	陥没危険度 A	-2.46	126
Ⅰ-2			0.30	陥没危険度 B	-2.39	122
Ⅰ-3			0.50	陥没危険度 C	-2.19	112
Ⅱ-1	1.00	0.50	0.20	陥没危険度 A	×	×
Ⅱ-2			0.60	陥没危険度 B	-2.87	146
Ⅱ-3			1.00	陥没危険度 C	-2.51	128
Ⅲ-1	1.50	0.75	0.30	陥没危険度 A	×	×
Ⅲ-2			0.90	陥没危険度 B	-3.48	178
Ⅲ-3			1.50	陥没危険度 C	-2.90	148

3.5 まとめ

同一発生深度かつ同一空洞幅の路面下空洞について断面形状の違いとたわみ量増加率の関係を表-3.5 で比較する。たわみ量増加率は断面形状、空洞規模にかかわらず、陥没危険度が大きいほど大きくなっている。また、断面形状にかかわらず、空洞規模が大きくなるとたわみ量増加率が大きくなる傾向が確認できる。

このことから、たわみ量増加率と陥没危険度は正比例の関係にあることが分かったが、空洞幅が大きくなるとたわみ量増加率が大きくなり、例えば空洞幅が 0.50m の場合の陥没危険度 A ランクのたわみ量増加率の値が空洞幅 1.00m の場合のたわみ量増加率では陥没危険度 C の場合に相当するなど、たわみ量増加率だけで異なる空洞幅の陥没危険度を評価すると混乱を招く可能性があり、評価の際には空洞規模を勘案する必要があることがわかる。

一方、同一の空洞規模では、矩形断面のたわみ量増加率が半円断面よりも大きくなっており、空洞の幅と発生深度が同一であっても、陥没危険度は半円断面のほうが小さいと判断できる。このことは、断面幅と発生深度が同一の場合、半円断面の陥没危険度を過大にあるいは、矩形断面の陥没危険度を過少に評価する可能性があることが示されていると考える。

以上より、現行の空洞発生深度と空洞幅のみで評価手法は、簡易判定法として、有意であると考えられるが、例えば、同一危険度ランクにおいて補修優先度を判断する際や、各危険度の境界付近の空洞を評価する際に正しく判断することが難しい。これに対し、レーダー探査から確認可能な空洞の断面形状等を勘案して、たわみ量増加率等の評価手法を導入することでより、合理的に空洞危険度を評価できると考える。

表-3.5 断面形状の違いによるたわみ量増加率の比較

空洞諸元			たわみ量増加率(%)	
空洞幅 (m)	発生深度 (m)	陥没危険度	半円断面	矩形断面
0.50	0.20	A	116	126
	0.30	B	114	122
	0.50	C	111	112
1.00	0.20	A	158	×
	0.60	B	128	146
	1.00	C	123	128
1.50	0.30	A	185	×
	0.90	B	142	178
	1.50	C	132	148

4. 今後の課題

4. 1 路面下空洞における輪荷重による路面動的変位計測

本研究によって、輪荷重による路面変位を CCD カメラおよび OCM を用いた解析で計測可能であることが確認された。一方で、現状の手法では計測に際しては、空洞中心のたわみ量を計測するためには、ダンブトラックを正確に空洞中心上を走らせる必要があるため、今回の計測においては、車線規制を行って計測を実施した。この結果、計測に多くの時間が必要となり、車両通行に影響を及ぼす結果になった。

本来、本計測手法は交通に及ぼす影響を小さくすることを目的としており、この問題を解決する方法として、複数回の輪荷重載荷を行い、空洞周辺の輪荷重による最大たわみ分布を計測し、空洞部の最大たわみ量を特定することが考えられる。複数回輪荷重を載荷した際の計測結果から、路面最大たわみ量を特定可能な解析ソフトの開発が必要となると考える。

4. 2 路面下空洞における輪荷重による路面動的変位計測

空洞をモデル化した FEM 解析によって、現行の路面下空洞の陥没危険度評価手法については、一定の妥当性が確認できた。一方で評価の鉛直断面形状が反映されていないため、危険度を合理的に評価できていない部分がある可能性が示された。本研究では、たわみ量増加率についての検討にとどまるが、今後、解析的に段階的に載荷を変化させて陥没時の荷重を求めることで空洞の陥没危険度と路面たわみの関係をより合理的に評価でき、空洞の相対的な陥没危険度評価に寄与できると考える。

参考文献：

- 1) 塚本 真也, 澁谷 啓, 梅田 隼, 白 濟民：道路表面のたわみ測定による陥没危険度評価方法の開発. 基礎工, pp. 40-42, 2019. 12.
- 2) 小泉 圭吾, 中西 典明, 福田 芳雄, 塚本 真也, 梅田 隼, 澁谷 啓：OCM による路面のたわみ計測技術に関する検討, 土木学会第 76 回年次学術講演会講演集, 2021. 9
- 3) 中西 典明, 小泉 圭吾, 塚本 真也, 福田 芳雄, 澁谷 啓：路面の動的たわみ計測への OCM の適用について, 第 56 回地盤工学研究発表会発表講演集, 2021. 7
- 4) 中西 典明, 小泉 圭吾, 塚本 真也, 梅田 隼, 福田 芳雄, 澁谷 啓：車両荷重による路面の動的たわみの計測について, 第 57 回地盤工学研究発表会発表講演集, 2022. 7

著 者

中西 典明	研究支援員，学士（工学）
小泉 圭吾	客員研究員、地球観測株式会社，博士（工学）、地盤工学
丁 經 凡	協和設計株式会社 博士（工学）、地盤工学
白 濟 民	元研究員、博士（工学）、地盤工学
塚本 真也	東亜道路工業株式会社，博士（工学）、舗装工学
福田 芳雄	地球観測株式会社 博士（工学）
梅 田 隼	東亜道路工業株式会社 学士（工学）
澁 谷 啓	所員，博士（工学）、地盤工学

謝辞：本研究の一部は（公財）昭瀝記念財団の研究助成を活用させていただいた。また，路面たわみ量計測では，神戸市に協力と助力を頂いた。ここに記して深甚の謝意を表する。